

世界最初の実用 P 波警報システム「ユレダス」 の現状と将来

中村 豊

正会員 工博 (株)システムアンドデータリサーチ (〒186-0003 東京都国立市富士見台 3-25-3)

現在、警報システムの防災上の重要性は広く認識されており、近年の大規模災害を伴う地震の連続的な発生は、各国において高度なリアルタイム地震防災システムの急速な普及を促進する可能性がある。日本では、阪神震災後の防災関連システムの構築や研究はようやく一段落した感があるが、大震災直後のシステム構築ラッシュにおいては、目的や対象が明確でないままにシステム構築が推進されたものも少なくない。P 波警報システム「ユレダス」は高速走行する新幹線の地震時安全性を少しでも向上させるものとして 16 年前に登場し、8 年前から新幹線で実用されている。ユレダスの機能は鉄道に限らずさまざまな分野で活用できるものと期待されている。ここでは、ユレダスの現状と将来について述べる。

Key Words: real-time, monitoring system, early warning system, p-wave alarm, destructiveness, magnitude, focal location, Vulnerability, earthquake disaster prevention

1. はじめに

1985 年ミチョアカン地震 (メキシコ)、1989 年ロムブリエタ地震 (USA)、1994 年ノースリッジ地震 (USA)、1995 年兵庫県南部地震 (日本) などが契機となって、リアルタイム地震防災の有効性が主張され始め、リアルタイム地震防災は次第に世界の注目を集めるところとなっている。もちろん、基本的なハードの対策がなければ、リアルタイム防災の効果は限定的なものとなる。リアルタイム警報システムは、あくまでも予期せぬ緊急事態に対処するもので、警報や情報に基づいた臨機応変、柔軟な対応が要求される。

リアルタイム地震防災システムの初期段階のものである地震警報システムは日本ではかなり普及している。特にエレベータの地震警報システムは、1978 年宮城県沖地震の際のエレベータ事故をきっかけに普及した。こうした地震警報システムは、ほかの地震国ではそれほど普及していない。しかし、現在、警報システムの防災上の重要性は広く認識されており、昨年の大規模災害を伴う地震の連続的な発生 (1999 年 8 月 17 日トルココジャエリ地震、1999 年 9 月 21 日台湾集集地震、1999 年 10 月メキシコプエブラ地震、1999 年 11 月トルコドゥズジェ地震) は、各国におい

て高度なリアルタイム地震防災システムの急速な普及を促進する可能性がある。

日本では、阪神震災後の防災関連システムの構築や研究はようやく一段落した。大震災直後のシステム構築ラッシュにおいては、目的や対象が明確でないままにシステム構築が推進されたものも少なくない。

ここでは、明確な目的と対象をもって開発された世界で唯一の実用 P 波警報システム「ユレダス」の現状と将来について概説する。

2. ユレダス小史

鉄道の場合、鉄道旅客の地震時の安全性を確保するという明確な目的のもとに、各種の警報地震計の開発と設置が行われてきた。特に、高速で走行する新幹線の場合、地震時の影響は在来線の比ではなく、新たな警報システムを開発設置することが、1964 年新潟地震を契機に真剣に検討されていた。1965 年 4 月 20 日に発生した大井川河口地震 (M6.1) は、開業間もない東海道新幹線に思わぬ被害を与えた。これが直接の契機となって、ほぼ 20km 毎の東海道新幹線の沿線変電所に警報地震計を設置して、地震を検知すると自動的に列車へのき電を停止して非常ブレーキを懸けさせ

るシステムが構築された。これがリアルタイム地震防災のはしりといえるかも知れない。その後、東北新幹線開業に向けて新しい地震警報システムの研究開発が1970年代後半から始められたが、1984年開業には間に合わず概念だけを取り入れて構築した早期警報システム「海岸線検知システム」がとりあえず導入されている(図1)。これは、大地震の発生地域に近接する太平洋沿岸で地震を検知し内陸を走る新幹線に警報を発するもので、地震をS波以後の大きな地震動で検知していた。

東北新幹線のために研究を開始した新しい警報システムの開発は、新しい考え方を導入して1983年「ユレダス」として結実した。その後何年も試験観測と改良を重ねて、1992年から東海道新幹線の地震時安全性を向上させるものとして稼働を始めている(図2)。東海道新幹線のユレダスの警報・情報は1997年から在来線でも利用されている。

ユレダスは当初、新幹線への適用を考えて開発研究が始められたが、最終的には一般に適用可能なシステムとして完成している。

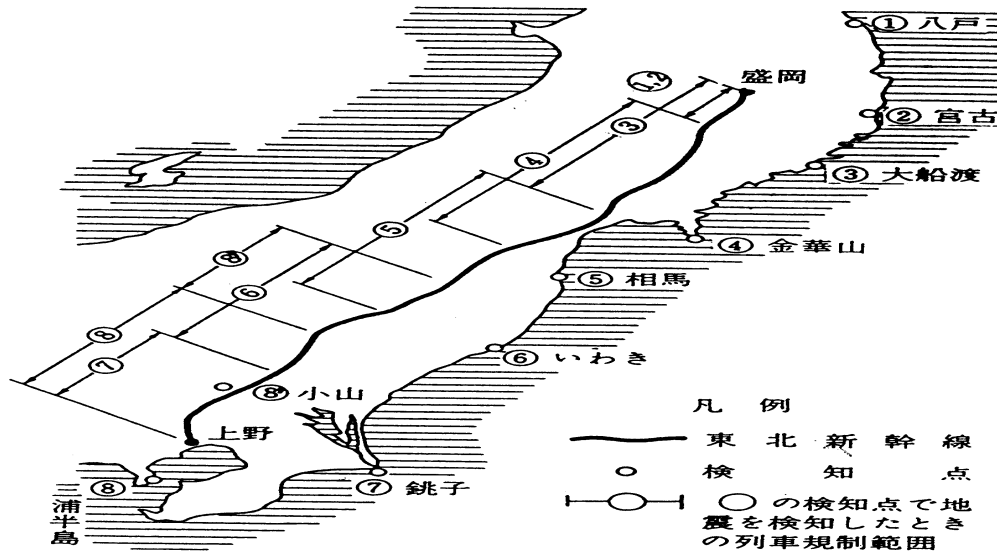


図1 海岸線検知システム(当初)

- Tokaido Shinkansen UrEDAS since 1992
- San'yo Shinkansen UrEDAS since 1996
- Tohoku- Joetsu- Nagano- Shinkansens Compact UrEDAS since 1998

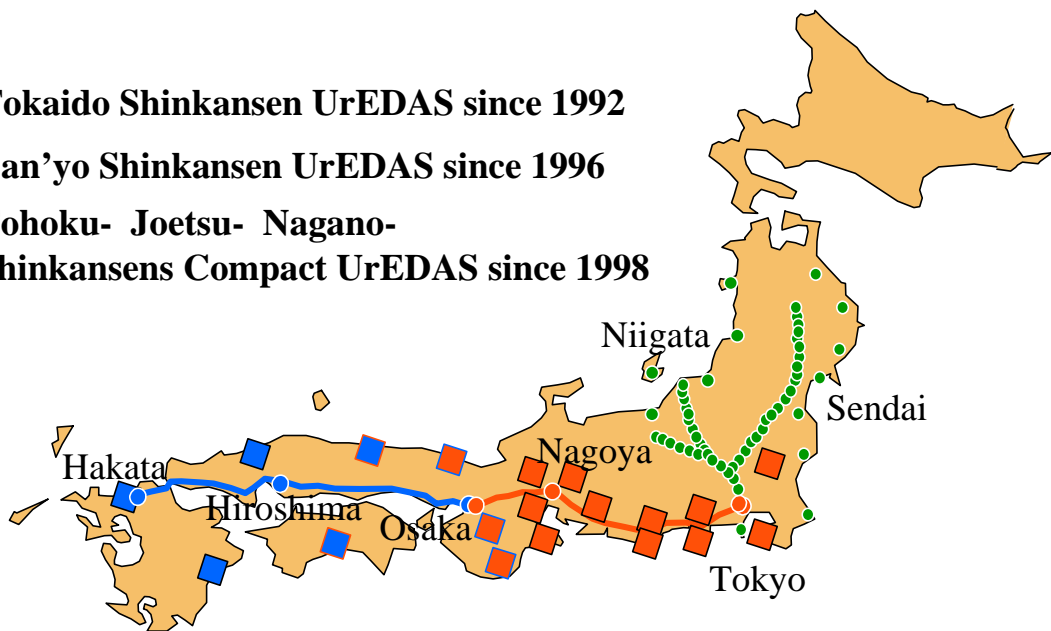


図2 日本におけるユレダスの分布

1995年兵庫県南部地震の後、1996年11月には山陽新幹線を対象にしたユレダスシステムが稼働し始めている。さらに、この地震を契機に、P波警報発令を検知後3秒から1秒程度に迅速化した新しい警報手法を開発（1998年）し、コンパクトユレダスの機能として採用され組み込まれている。

東北新幹線などの海岸線検知システムや沿線警報地震計の更新システムとして、新しいP波警報機能の可能性を持った「コンパクトユレダス」が採用され、1997年に設置された。1年有余の観測データ収集と調整を経て、1998年11月から新しいP波警報機能が組み込まれて稼働している（図3）。このシステムは、海岸線のみならず東北新幹線、上越新幹線、長野新幹

3. リアルタイム地震防災システムの考え方

地震被害は、地震外力が地盤や構造物のもつ耐力を上回ったときに発生する。構造物を耐震的にすることは地震災害軽減の基本である。しかし、想定を上回る地震力に襲われる可能性は少なくなく、また、経年劣化による耐力の低下も考慮しなくてはならない。

災害を防止する、ないしは、発生した災害の影響を最小限に抑える、ということは安全で快適な社会生活を維持する上での基本的な要請である。発生した被害に迅速に対応し、影響を最小限度に抑えるためには、常に地震外力の大きさを監視しておく必要がある。

すなわち、地震外力を監視し、適切に事前調査され



図3 JR東日本におけるコンパクトユレダスの分布

線の線路沿線や日本海側海岸線にも設置され、地震をより早く検知し、警報する体制が出来上がっている。

ユレダスやコンパクトユレダスは、本来の汎用警報機能を活かして鉄道以外の分野へ適用範囲を拡大しつつある。ユレダスを津波警報システムに利用するアイデアは開発当初からあったが、実現するには至らなかった。しかし、それも間もなく実現する。この野心的なシステムが多くの沿岸自治体で採用され、津波災害の軽減に貢献することを期待している。

た地震耐力と比較対照の上、その危険度を評価して、災害対応のための人的資源や物的資源を集中的に投入する箇所を的確に推測する。この推測結果を実際の被害状況により適宜修正しながら、合理的な対応を進めていく、というのが発災時の対応シナリオとなる。

この迅速な対応を支援するものがリアルタイム地震防災システムであり、地震動を監視する警報システムと発災前の事前調査システムおよびこれらのデータをリアルタイムに統合して危険性を評価する統合評価シ

システムとからなる。さらに付け加えるならば、発生している被害状況を確認する被害確認システムがある。

これらのシステムのリアルタイム性を現象が生じている時刻との差で表現すれば次のようになる。警報システムは、1秒～3秒の遅れ、調査システムは当面リアルタイム性の必要がない、統合評価システムは5分程度、被害確認システムは1時間程度が目安となる。調査システムは機能的には被害確認システムと同一であり、将来的には、リアルタイム健全度監視システムへ発展するものと考えられる。このシステムは、地震による損壊を急速に健全度が失われる現象として捉え、より迅速な対応を可能にするものと期待される。

センサーを多用する地震動監視、健全度監視システムを現実のものにするためには、センサーの小型化、低廉化が不可欠であるが、将来的には衛星画像などを用いた全く新しい監視方法の開発も考えられる。

将来的には、地震動監視と耐力（健全度）監視がそれぞれリアルタイムに行われ、迅速な警報とともに、的確な被害予測や緊急対応のための情報が時々刻々必要箇所に伝達されるなど、生命体のように社会全体が有機的に結合して外乱に対処するようになっていくものと想像される。さらに、生きているかのように外力に反応したり部材を自律的に再生したりする構造物の出現も将来的には期待される。

遠い将来の地震防災体制はさておき、最近、耐震的でない建物が地震に直撃され、崩壊する例は枚挙に暇がない。パンケーキ状に崩壊した建物に閉じ込められた生存者を救出する光景が大きな地震の度に繰り返される。しかし、わずかな空間を確保できる避難シェルターのようなものを各建物各階に設置して、地震時にそこに避難させることができれば、人的被害を大幅に低減できるに違いない。つまり事前の周到な準備が前提になるが、目的と対象が明らかで、警報後のとるべき行動が明確であるならば、一般市民に対する地震警報は非常に有効に機能するものと期待される。

また、構造物が破壊されなくても強い地震動に翻弄されて機能が果たせなくなり不測の事態を惹き起こす可能性がある。こうした二次災害を防止する目的からも地震警報は有効である。

メキシコでは、近い将来の襲来がおそれられているゲレロ地震の猛威からメキシコシティを守るための警報システムSASが1991年から稼働している。これは、アカプルコを中心に12個の強震地震計ネットワークを太平洋沿岸に直線状に20km間隔で配置して、強震動を検知するとメキシコシティに対して警報発令するというものである。このシステムの特徴は、警報の対象が自動機器だけではなく、一般市民を含むこと

である。むしろこのシステムの警報対象は一般市民であるといってもいいくらいである。その警報はラジオ・テレビなどの放送メディアを通じて、または、スピーカシステムなどによるサイレンや音声によって伝えられる。一般市民を警報対象としているだけに、警報を受けた後の行動についてはポスター、訓練などにより周知徹底が図られている。

4. コレダスの機能概要

コレダスは、一点三方向成分の地震動情報を用いて、地震の監視を行い、被害をもたらす可能性がある地震に対して、P波検知後いち早く警報を発令する。これにより、迅速な対応を行わせ、被害の軽減を図るというものである。このコレダスは警報対象地域が地震検知点を中心に半径200km程度と広く、場合によっては地震動より先に警報が到達することがある。

これに対して、自分を中心にした半径20km以下の地域にしか警報を出せないが迅速な警報を実現したコンパクトコレダスがある。検知から警報発令までの時間は、コレダスで3秒～4秒、コンパクトコレダスで1秒程度、となっている。

コレダスは、表層地盤の特性を除去するため、岩盤中にトンネルを掘り込み、その中に設置される。コレダスは検知した地震のマグニチュード、位置、深さなどをP波検知後3秒で推定し、1秒以内に危険地域を判定した後、必要地域に警報を発令する。

一方、コンパクトコレダスは検知した地震動の危険性を判断してその周辺に警報を発令する。コンパクトコレダスは、設置される地点の表層地質の影響を考慮して警報しきい値が決められるため、設置のための条件は在来型コレダスに比して緩やかで、概ねどのような場所にも設置できる。監視している地震動の危険性(DI、Damage Intensity、後述)の最大値(DI値)は計測震度と極めて相関が高い。計測震度が地震が終了した後でないと算定できないのに対して、DIはリアルタイム計測が可能という特長がある。このため、DIの変動を時々刻々監視して、P波部分のDIの最大値(PI値)が基準値を超過すれば直ちに警報を発令することができるという特長を持っている。なお、地震動が継続する間、加害性の再評価を連続して行い、必要に応じて改めて警報を発することができる。このため、たとえP波部分で被害地震を見逃したとしても、主要動の開始部分で確度の高い警報を出すことができる。この場合の警報タイミングは従来警報と同等だが、その確度ははるかに高い。あわせて通常の加速度警報も発令することができる。主要動到来後には、DI値がリア

リアルタイム計測されており、被害との対応関係がよいDI値を用いて的確な対応を進めることが可能となる。

5. 地震動の危険性（発災強度 DI）

地震動の危険性指標 DI は地震動の加害性の変動をリアルタイムに把握するために考え出されたものである。地震動が作用する物体に対してなす仕事の単位時間当たりの大きさは、物体に注入される単位時間当たりのエネルギーの大きさを表し、発災の危険性を表現していると考えられる。地盤や構造物の固有振動数を F とし増幅倍率を A とした場合に、 F^2/A で定義される K 値と被害の相関が良いことは、この考えを支持している。

DI とは、地震動が作用する物体に地震動がする仕事率（パワー）を物体の質量で除した量を常用対数表示したもので、以下のように定義される。DI の最大値である DI 値が大きい地震動は破壊力が大きいと判断できる（DI 関連技術は SDR にて特許申請中）すなわち、

$$DI = \log_{10}(\text{地震慣性力} \times \text{応答変位} \div \text{変位時間} \div \text{質量}) \\ = \log_{10}(\text{応答加速度} \wedge \text{ケトル} \cdot \text{応答速度} \wedge \text{ケトル})$$

ここで、演算子「 \cdot 」は内積を意味する。

ここでは、加速度および速度の単位として、それ

ぞれ、Gal (= cm/s^2)、mkine (= $\text{cm/s}/1000$) を採用している。K-net のデータを用いて得た、DI 値と計測震度 I_{jma} の関係を図 4 に示す。これによると、両者の相関は極めて高いことがわかる。

6. 阪神大震災以降の取り組み

コンビニなどで記録された阪神大震災発生時の映像をみると、P 波到着後数秒で大きな振動が始まっている。したがって、コレダスが震源地にあったとしても警報と同時に大きく揺れ始めることになり、その効果はほとんどなかったものと考えられる。そこで、少しでも早く警報が出せるように直下で地震が発生したような場合でも対処できるような新しいコンパクトコレダスを開発した。コンパクトコレダスは、1997 年に JR 東日本に計 56 台導入された。地震記録を収集して、P 波警報が出せるように調整が行なわれた。P 波警報機能は 1998 年 11 月から東北新幹線・上越新幹線・長野新幹線で実用に供されている（図 3）

コンパクトコレダスは、1998 年、営団地下鉄に 6 台導入されており、P 波警報機能の調整が進んでいる。

コレダスを津波警報システムの中心システムとして利用しようとする試みも進んでいる。コレダスを用いた津波警報システムの試みは海岸に面した多くの自治体で進められるものと期待している。

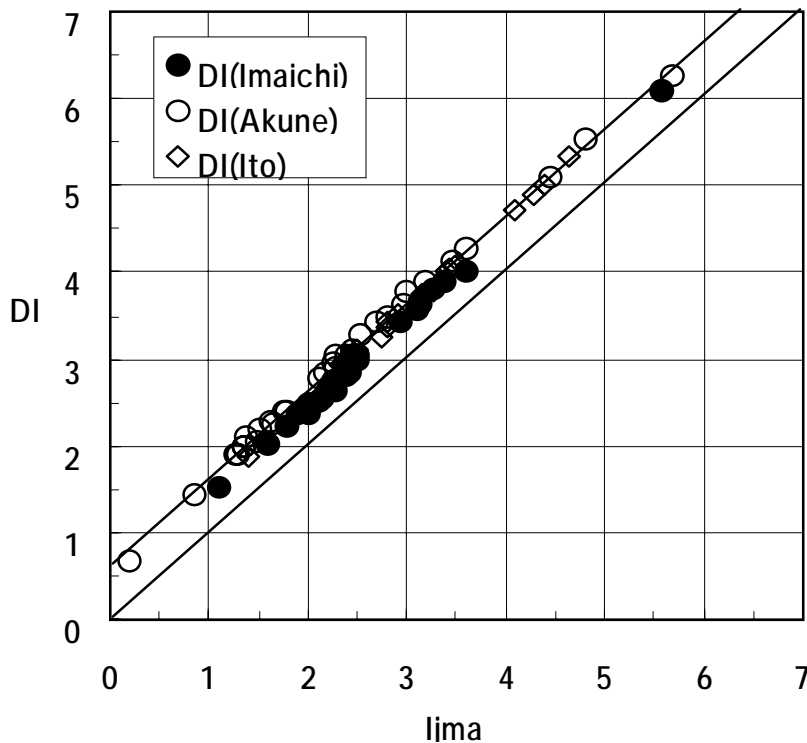


図 4 DI と計測震度の関係

1999年8月18日のトルコ・コジャエリ地震の前の6月に、ボアジチ大学カンディリ地震研究所(KOERI)を訪れた際、イスタンブールを襲うかも知れない地震を監視するため、ユレダスを用いた共同研究の可能性について協議した。具体化する前に、コジャエリ地震が先に発生してしまったが、コジャエリ地震は想定していたものではなく、想定地震の発生については未だにその危険性が消えておらず監視する必要があるとの見解が示された。そこで、手持ちのユレダスをイスタンブールまで運び、KOERIに設置して、SDR-KOERI共同観測を開始した。このユレダスは、調整が完了していないものの、概ね順調に稼働し、最大余震など、頻発する余震活動を的確に捕捉して、位置とマグニチュードを表示しつづけている。

そのほか、メキシコシティーにも9月の地震後11月にCIRES(SASの運営主体)と協力してユレダスを設置し、SDR-CIRES共同観測を開始した。現在、調整に使う地震波形データの収集を行っているところである。アメリカや日本国内でもいくつかの研究機関がSDRと共同研究を始める計画が進んでいる。

7. 気象情報システムと地震防災システムの比較

リアルタイム地震防災システムが、ほかの災害情報システムと大きく異なるのは、リアルタイム性の違いである。気象情報システムの場合、分秒を争うほどのリアルタイム性は不要であり、1時間程度の相違は通常何の問題もない。しかし、地震防災システムにとって必要なリアルタイム性は、警報を扱う場合には秒を争うものであり、地震直後の情報を扱う場合には分を単位とするものである。実際に被害が発生した地震であっても、直ちには被害箇所がわかるわけではないので、事前の調査データに基づく的確な被害予測情報は、迅速な人命救助などには欠かす事のできない重要な情報である。これには分単位で提供される正確な地震情報が不可欠となる。

気象の情報や警報が広域の観測情報に基づいて提供されるのに対して、地震防災のための警報や情報は、比較的局所的な情報に基づいて提供される。地震警報は秒を争うものであり、局所的な情報に基づいて、それぞれの場所、機関で、迅速な警報を出す必要があるのである。

しかし、地震動が収まった後、迅速に被害状況の把握、復旧、救助などを行うためには、広域での正確な情報が不可欠となる。こうした情報を提供できるのは国家機関しかなく、気象庁などがその役割を担うことになる。すなわち、地震警報については局所的な情報

に基づき、それぞれの機関で的確で迅速に発令し、地震後の正確な情報については速やかに気象庁が提供して地震後の対応を迅速で的確なものとするというのが理想的な姿と考えられる。地方行政機関や企業による地震発生時の緊急対応と地震直後の気象庁などによる広域的な情報提供がうまく連携すれば、地震後の対応も合理的に行うことができ、防災意識を向上させる上からも喜ばしいことである。

気象庁は、地震に関してリアルタイム警報サービスの実現をめざすのではなく、地震終了後速やかにその地震の正確な情報を広く伝えることに専念してもらいたいものである。

なお、情報伝達の方法として、現在では各種放送メディア、各種通信手段、インターネットほかさまざまなものが考えられる。

8. おわりに

地震動の初動で警報を出すユレダスは、地震予知が不可能な現時点における究極の地震警報システムであると言える。しかし、迅速な警報も事前の準備が無ければ、防災効果を十分に発揮することができない。

今後、ユレダスのパイオニアとして、ユレダスの検知情報の精度を向上させるとともに、ユレダスとしてどのような情報を発信すべきか、どのような分野でどのような利用方法があるのか、などを実際に即して検討していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 中村：総合地震防災システムの研究。土木学会論文集I、No.531/I-34、1996-1
- 2) Yutaka NAKAMURA: A New Concept for the Earthquake Vulnerability Estimation and its Application to the Early Warning System, EWC98, September 7-11, Potsdam, Germany.
- 3) <http://www.jreast.co.jp/news/nr/nr068/index.html>